

南海盐度对南海夏季风响应的初步分析*

李秀珍¹, 梁卫¹, 温之平¹, 蔡榕硕²

(1. 中山大学季风与环境研究中心/大气科学系, 广东 广州 510275; 2. 国家海洋局第三海洋研究所/国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 为分析南海盐度对南海夏季风的响应情况, 采用1967—2001年共35年的月平均海洋同化数据(SODA)等资料, 利用合成等分析方法, 探讨了南海上层盐度与净淡水通量、风应力、Ekman抽吸速度的关系以及不同海域盐度对南海夏季风爆发以及季风强度的响应。结果表明, 随着南海夏季风建立, 南海北部、东部的盐度降低, 南部盐度增加。在强季风年, 南海北部沿岸、东部盐度偏低, 南海南部马来西亚以北海域盐度偏高; 弱季风年南海盐度异常分布则为北部、东部盐度偏高, 南部盐度偏低。南海上层盐度对南海夏季风爆发和季风强度的响应均与南海的净淡水通量、风应力、Ekman抽吸速度存在密切关系。

关键词: 南海; 盐度; 夏季风; 响应

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0029-06

Preliminary study on the salinity characteristics of South China Sea and its response to the summer monsoon

LI Xiu-zhen¹, LIANG Wei¹, WEN Zhi-ping¹, CAI Rong-shuo²

(1. Center for Monsoon and Environment Research/Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration/Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, SOA, Xiamen 361005, China)

Abstract: Using the simple ocean data assimilation (SODA) data from 1967 to 2001, this study revealed the upper level salinity distribution in the South China Sea (SCS) and its response to the activity and intensity of the SCS monsoon. The results indicate that with the onset of the SCS monsoon, the high-salinity tongue in the northern and southern SCS weaken and retreat eastward, the salinity decreases in the northern and eastern SCS but increases in the southern SCS. In the strong monsoon years, the anomalous salinity is negative in the coastal sea area and the eastern SCS, but positive in the southern SCS. In the weak monsoon years, the anomalous pattern of salinity is the opposite. The upper level salinity's response to the activity and intensity of the SCS monsoon in the SCS is closely related to the net freshwater flux, wind stress, and Ekman pumping.

Key words: South China Sea; salinity; summer monsoon; response

盐度是海水中含盐量的一个标度, 它与温度、压力是研究海水的物理过程和化学过程的基本参数。根据大洋中盐度分布的特征, 可以鉴别水团和了解其运动的情况。南海是我国最南端的边缘海, 关于南海盐度特征的研究具有重要的现实意义。田

天等^[1]通过2002年在南海及巴士海峡附近太平洋海域观测, 分析了南海北部的温盐特征; 赫崇本等^[2]利用历史航次资料研究了南海中部NE-SW向断面的热盐结构; 刘增宏等^[3]划出南海存在的9个主要水团, 并对各水团的温、盐特征进行分析, 得出一些

收稿日期: 2009-08-06; 修订日期: 2009-11-22。孙淑杰编辑

基金项目: 国家海洋局科研项目(国海科字[2008]307); 国家“908”专项资助项目(908-02-01-02)

作者简介: 李秀珍(1986—), 女, 广东省江门市人, 在读研究生, 从事水汽输送与季风降水研究。E-mail: xiuzhenli2@student.cityu.edu.hk

通信作者: 温之平, 男, 教授, 博士, 主要从事季风与海气相互作用研究。E-mail: eeswzp@mail.sysu.edu.cn

* 感谢国家海洋局南海预报中心吴迪生高工为本研究提供的南沙、西沙海洋环境监测站的逐日实测资料以及在本研究过程提供的悉心指导!

有意义的结果。

南海同时是亚洲夏季风最早爆发的地区, 其上层盐度结构对夏季风活动的响应是海洋、气象学家们重点关注的课题。1998年“南海季风试验(SCSMEX)”期间, 盐度对季风响应的研究是试验中一项重要内容; 王凡等^[4]根据 SCSMEX 期间所获的 CTD 资料, 分析了夏季风爆发前后南海主要断面的温盐结构及其变化特征; 毛庆文等^[5]利用 2002 年南沙群岛海域的水文观测资料分析了季风转换期间该海域的温盐分布特征; 杜岩等^[6]利用航次的温盐资料研究了春、夏季风转换期间南海南部混合层以下盐度异常水体的空间结构特征。

但一直以來, 由于海上观测存在的种种困难, 盐度资料往往限于某些航次, 连续长时间的观测资料较少, 因而从气候尺度来研究南海盐度对夏季风响应的工作仍较少。本文将利用 1967—2001 年共 35 年海洋同化数据(SODA)对南海区域盐度对夏季风的响应进行研究, 首先对南海夏季风爆发日期及强度指数进行统计分析, 然后从气候平均角度上分析南海盐度对夏季风爆发的响应, 再而探讨南海盐度在季风强度异常年份的异常特征及初步原因, 最后利用单站日实测资料分析盐度对夏季风各活动阶段的响应。

1 资料来源

本文所用到的资料有:

1) 月平均的海洋同化数据(simple ocean data assimilation (SODA) version1.4.0)^[7], 包括盐度、风应力等物理量, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2) 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)所提供的 ERA-40 降水率、蒸发率再分析资料^[9], 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

3) 美国国家环境预报中心(NCEP)所提供的风场资料^[10], 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

上述再分析资料均采用 1967—2001 年的共同时间段。

4) 南沙、西沙海洋站观测资料。

2 南海夏季风强度指数

采用吴尚森等^[11]提出的南海夏季风强度指数对南海夏季风的强度进行定义, 即 6—8 月 850hPa 南海区域(10° — 20° N, 110° — 120° E)标准化的西南风作为南海夏季风强度指数(I):

$$I = \frac{V_{SW} - \bar{V}_{SW}}{\sigma_{SW}}$$

式中 $V_{SW} = (u+v)/\sqrt{2}$, u 、 v 分别是纬向风速和经向风速, \bar{V}_{SW} 为季的多年平均值, σ_{SW} 为 V_{SW} 的标准差。由上式算出的南海夏季风强度指数序列, 去掉线性趋势后如图 1 所示。

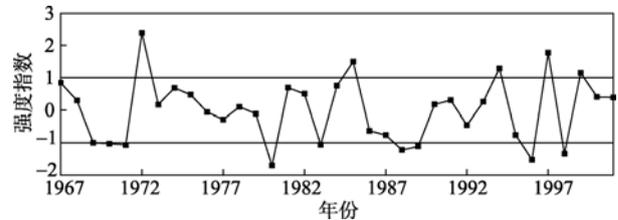


图 1 1967—2001 年南海夏季风强度指数序列

Fig. 1 The intensity index of SCS summer monsoon from 1967 to 2001

以强度指数 $I \geq 1$ 为南海夏季风偏强年, $I < -1$ 为偏弱年, 得出 1967—2001 年的南海夏季风异常年份如表 1 所示。

表 1 1967—2001 年的南海夏季风异常年份

Tab. 1 The years with anomalous SCS summer monsoon intensity from 1967 to 2001

强指数年	弱指数年
1972, 1985, 1994, 1997, 1999	1970, 1971, 1980, 1983, 1988, 1989, 1996, 1998

3 南海盐度对南海季风爆发的响应

3.1 季风爆发前后南海盐度的变化

4 月, 南海海区 5m 深的海水盐度整体上从南至北递增, 南海南部盐度基本上都在 34‰ 以下, 南海北部则在 34.4‰ 左右, 比较明显的几个盐度低值区位于南海西北部的北部湾和南海南部的马来西亚北部海域, 这与岸上众多河流出海口的淡水输入有关; 盐度高值区则主要南海东部与太平洋连通的海域, 从巴士海峡向西延伸出一条很长的高盐水舌, 盐度为 34.4‰ 的等值线一直伸到海南岛以南海域, 越往东盐度越高(图 2a), 这与黑潮水的入侵以及巴士海峡至海南岛之间的上升流有关^[12-13]。南海南部在连通苏禄海的巴拉巴克海峡的西侧海区存在一自东向西逐渐减弱的高盐水舌, 该高盐水舌主要是由该海区的气候环境特征——雨量较少, 风力以 2—3 级为主, 热量摄入多, 蒸发强, 形成比较浅薄的相对高盐水层——所造成, 苏禄海水的入侵虽然也是高盐水的来源之一, 但因苏禄海流入的水量较少,

其影响只限于该海区的东部^[14]。

从5月到6月(图2b、c、d), 随着南海夏季风建立, 前汛期到来, 各大入海河流的径流量增加, 南海北部沿岸以及中南半岛南端的沿岸海域海水盐度迅速降低。由于原入侵南海的两支高盐舌出现

东撤减弱, 南海东侧海水盐度呈下降趋势。盐度上升区主要位于南海西南侧, 其中增幅中心位于马来西亚以北海域, 达0.3‰。

总的来说, 伴随南海夏季风爆发, 南海西南部海域海水盐度上升, 东北侧盐度下降。

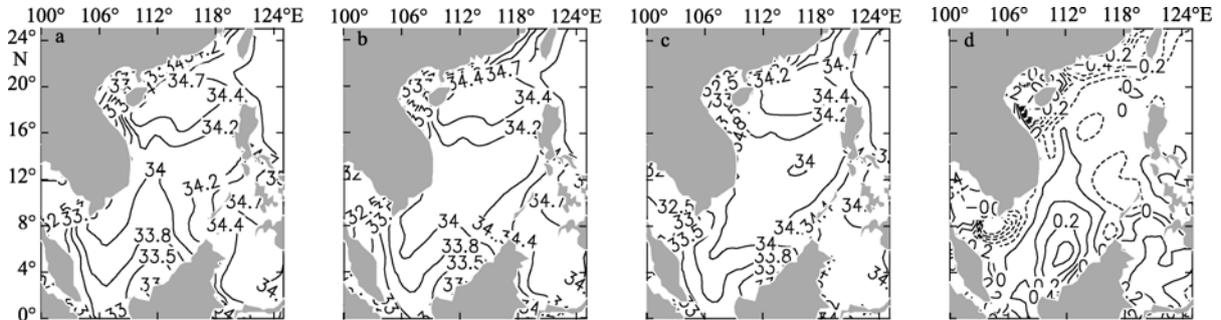


图2 1967—2001年南海5m层盐度(单位: ‰)的气候平均特征

a. 4月; b. 5月; c. 6月; d. 6月减4月

Fig. 2 Climatological monthly salinity (units: psu) pattern of the SCS at the depth of 5m, for (a) April, (b) May, (c) June, and (d) June minus April

3.2 季风爆发前后盐度变化的原因初探

由以上分析可知, 南海盐度的分布在夏季风爆发前后发生明显变化。是什么原因造成南海盐度的变化呢? 南海盐度对南海夏季风爆发和强度的响应如何? 下面将尝试从直接影响盐度的净淡水通量^[15]以及间接影响盐度的风应力及其旋度导致的垂直混合(Ekman pumping)来寻找可能的解释。

3.2.1 净淡水通量

南海夏季风爆发前(图3), 南海北部处于降水-

蒸发基本平衡的状态, 南海南部降水略大于蒸发。伴随夏季风爆发, 南海上的降水明显增多, 增幅中心位于南海中北部, 菲律宾西侧的大范围海域, 增幅可达 $9\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 南海南部由北向南降水的增加量迅速递减(图略); 南海大部分海域蒸发量略为上升, 中心大致位于南海中南部, 增幅约为 $2\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (图略), 远远小于降水的增加量; 因而, 南海的净淡水通量在季风爆发前后的变化特征主要与降水的变化特征一致。南海北部、东部的净淡水输入增加与该海区的盐度下降相一致。

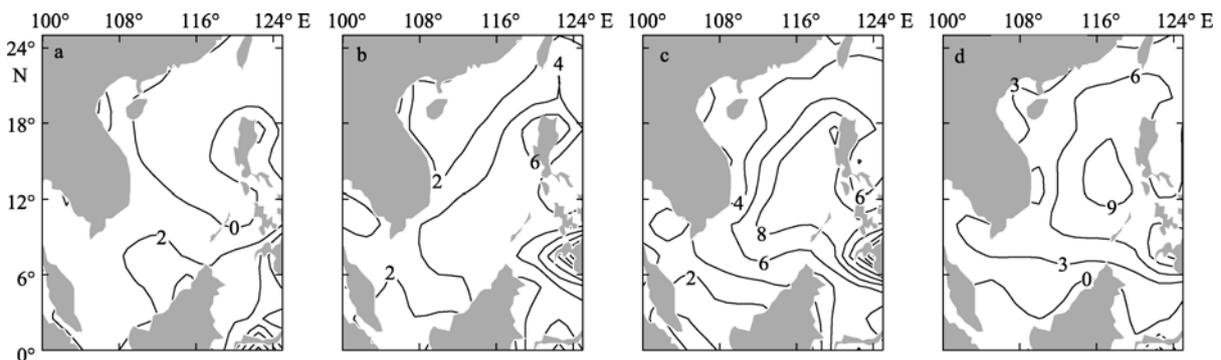


图3 1967—2001年南海5m层净淡水通量(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)的气候平均特征

a. 4月; b. 5月; c. 6月; d. 6月减4月

Fig. 3 Same as Fig. 2, except for net freshwater flux (units: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

3.2.2 海表风应力

海表风是海洋上层环流的主要驱动力。研究表明, 海表风场不仅决定上层环流的平均状态, 而且在环流的季节变化中也起到重要的作用。南海的风场主要受季风支配, 夏季为西南季风, 冬

季为东北季风, 因而南海环流结构呈明显的季节差异^[16]。

4月, 南海海表所受到的风应力如图4a所示。在风应力的作用下, 南海的上层环流表现为, 黑潮水及苏禄海高盐度海水经海峡入侵南海, 形成南海

北部和南部的高盐水舌。伴随夏季风爆发, 风应力方向由原来的自东向西转为西南方向, 相应地, 高

盐水入侵的现象逐渐消失, 高盐水舌东撤, 南海北部、南部盐度降低。

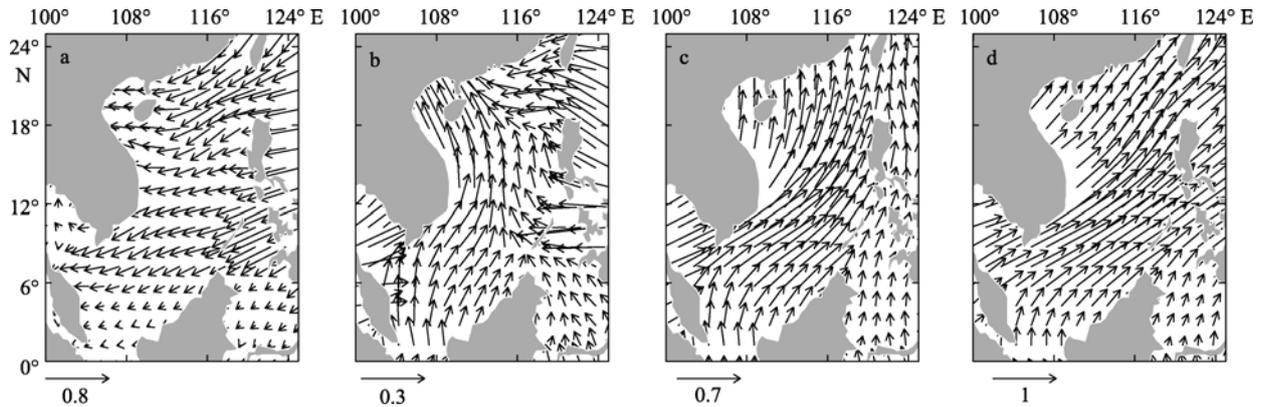


图4 1967—2001年南海5m层风应力(单位: $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)的气候平均特征

a. 4月; b. 5月; c. 6月; d. 6月减4月

Fig. 4 Same as Fig. 2, except for wind stress (units: $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)

3.2.3 Ekman 抽吸

采用 SODA $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球再分析月平均资料中的海表风应力场来计算 Ekman 抽吸:

$$w_e = -\text{curl}(\bar{\tau} / \rho_0 f) = -[\text{curl}(\bar{\tau} / \sin \varphi)] / (2\Omega\rho_0)$$

其中地球自转角速度 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 海水密度 $\rho_0 = 1.027 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, f 为科氏参数, φ 为纬度值, $\bar{\tau}$ 为海表风应力^[17]。计算所得南海海区的 Ekman 抽吸如图 5 所示。

4月, 南海仍受残余的东北季风影响, 南海北部风应力呈反气旋式切变, 所以北部 Ekman 抽吸速

度小于 $0 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$; 而南海南部为气旋式切变所控制, Ekman 抽吸速度小于 $0 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。5月, 控制南海的风应力及其旋度较小, 南海上的 Ekman 抽吸作用也较小。6月, 伴随南海夏季风爆发, 南海转为受西南季风控制, 南海北部风应力主要呈气旋式切变, 在 Ekman 抽吸引起海水的混合作用由上升变为下沉运动; 南部则相反, 由下沉变为上升运动。由于, 海水的上升运动常伴随底层的高盐度海水向上混合, 使得海表盐度增加, 这在一定程度上解释了南海夏季风爆发后, 南海南部海水盐度上升的现象。

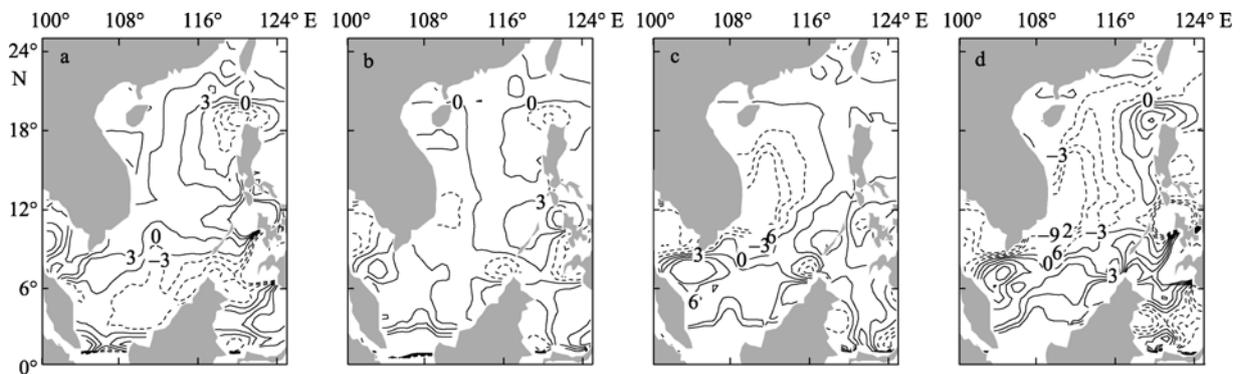


图5 1967—2001年南海5m层 Ekman 抽吸速度(单位: $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)的气候平均特征

a. 4月; b. 5月; c. 6月; d. 6月减4月

Fig. 5 Same as Fig. 2, except for Ekman pumping velocity (units: $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)

综合以上影响盐度的因子, 便可初步解释夏季风爆发前后南海盐度的变化的原因。

3.3 南海盐度对季风强弱的响应及原因

南海盐度与南海的净淡水通量、风应力及其旋度导致的 Ekman 抽吸等存在密切关系。在南海夏季风强度异常年份, 南海上的净淡水通量以及风应力等也存在明显异常。季风异常年, 盐度对这些影响

因子的异常是如何响应呢? 为解答这个问题, 以下将根据表 1 所选取的南海夏季风异常偏强年、偏弱年分别对盐度、净淡水通量等的异常进行合成分析, 进而了解南海盐度对夏季风强弱的响应及可能原因。

在强季风年, 南海北部沿岸、东部盐度偏低, 南海南部马来西亚以北海域盐度偏高; 弱季风年南

海盐度异常分布则为北部、东部盐度偏高, 南部盐度偏低。

到底是什么原因造成强季风年南海盐度的异常呢? 下面将通过分析净淡水通量等影响盐度变化的因子在强季风年的异常特征来探讨盐度异常的可能原因。

强季风年, 南海上的净淡水通量距平为北正南负(图 6b), 净淡水通量距平很大程度上取决于降水

量的距平值(图略), 因而强季风年南海北部降水偏多, 南部降水偏少; 风应力异常场表现为西南方向的风应力距平, 即在强季风年份风应力是加强的(图 6c); Ekman 抽吸的垂直混合速度西北部为负距平, 东南部为正距平(图 6d), 即强季风年南海西北部为异常下沉运动, 东南部为异常上升运动。弱季风年各物理量的距平值分布(图 6f—h)基本与强季风年的相反。

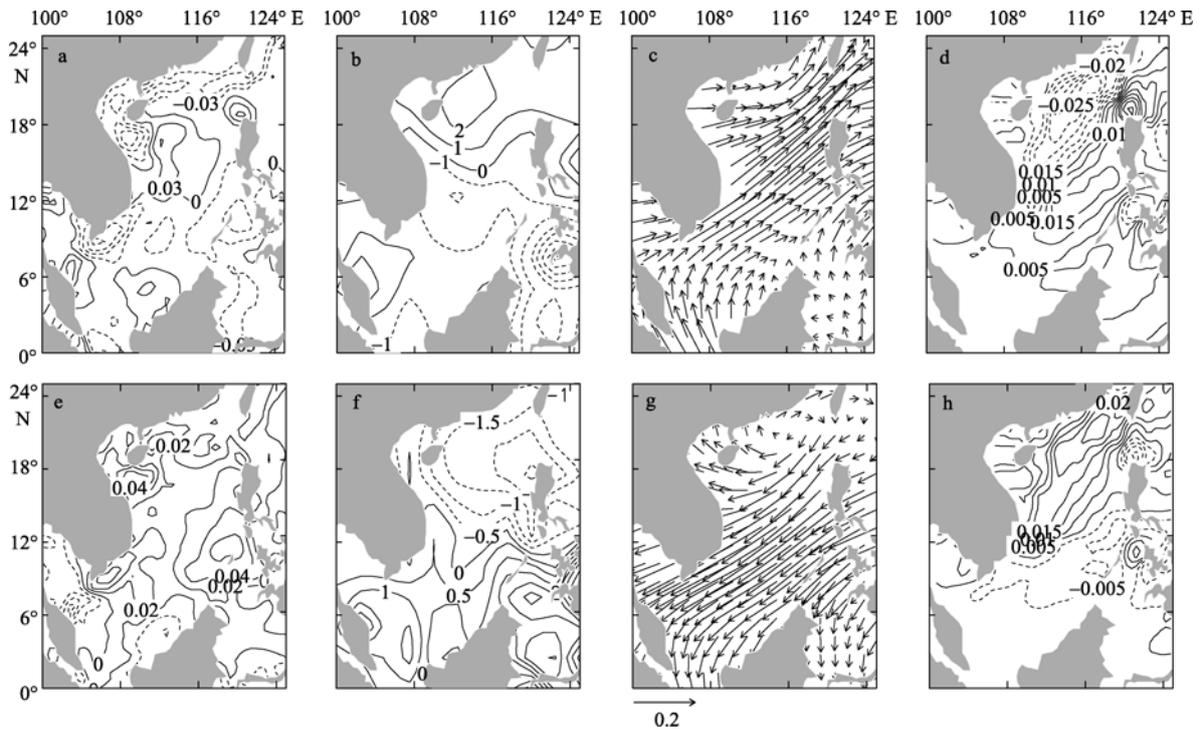


图 6 强/弱季风年各量的距平合成图(强/弱季风年减去气候平均)

a, e. 盐度; b, f. 净淡水通量; c, g. 风应力; d, h. Ekman 抽吸。其中 a—d 为强季风年距平, e—h 为弱季风年距平

Fig. 6 Composite distribution of variations in strong/weak summer monsoon years (strong/weak monsoon years minus climatological mean), with (a) and (e) for salinity, (b) and (f) for net freshwater flux, (c) and (g) for wind stress, and (d) and (h) for Ekman pumping. (a—d) represent strong summer monsoon years, and (e—h) represent weak summer monsoon years

可见在强季风年, 南海北部沿岸海域由于净淡水输入增加, 同时 Ekman 抽吸以异常下沉运动为主, 导致盐度偏低, 尤其以河流出海口处盐度下降最明显(图 6a); 南海东部受黑潮高盐水入侵的海区, 在西南风应力异常的作用下东撤明显, 盐度为负距平; 南海南部马来西亚以北的海域由于净淡水输入减少, Ekman 抽吸为上升异常, 海水盐度增加。弱季风年, 南海北部由于净淡水通量减少, Ekman 抽吸为异常上升运动, 盐度为正距平(图 6e); 南海东部受黑潮高盐水入侵的海区, 在东北风应力异常的作用下东撤较弱, 盐度为正距平; 南海南部由于净淡水输入增加, Ekman 抽吸为下沉异常, 海水盐度下降。

3.4 单站实测盐度对夏季风活动的响应

为了从更小的时间尺度上分析南海盐度对季风活动的响应, 下文将利用南海上两个站点的日实测资料进行分析。这两个站点分别: 南沙站(9°33'N, 112°53'E), 位于南海南部的北面; 西沙站(16°50'N, 112°20'E), 位于南海中北部。表 2 为南沙、西沙站 2002—2007 年季风爆发前后盐度的变化。

分析表 2 可以看到, 除 2003、2007 年外西沙站的盐度比南沙站的盐度普遍要高 1‰, 这与上文的南海盐度南低北高的分布情况相一致。另外, 南沙站除了 2006 年外, 其他年份盐度在季风爆发后呈升高趋势; 西沙站在季风爆发后除了在 2003 年盐度增加及 2007 年盐度几乎不变外, 其他年份盐度都明显降低; 这也与上文的分析结果相一致。

表 2 南沙、西沙站 2002—2007 年季风爆发前后盐度(单位: ‰)的变化

Tab. 2 Variation of salinity (units: ‰) before and after the onset of SCS summer monsoon at stations in Nansha and Xisha from 2002 to 2007

年份	南沙站			西沙站		
	爆发前	爆发后	爆发后-前	爆发前	爆发后	爆发后-前
2002	32.57	32.79	0.22	34.25	33.74	-0.51
2003	33.64	33.83	0.19	33.67	33.99	0.32
2004	32.91	33.05	0.14	34.15	34.09	-0.06
2005	—	—	—	34.26	34.07	-0.18
2006	33.07	32.96	-0.11	34.37	34.15	-0.22
2007	33.79	33.90	0.11	33.45	33.48	0.03

注: 2005 年南沙站的盐度资料缺失。爆发前、后的盐度分别为爆发前、后 10 天的盐度平均。

4 结语

采用 1967—2001 年月平均的海洋同化数据(SODA)等资料, 分析了南海上层盐度与海面净淡水通量、风应力等的关系, 探讨了不同海域盐度对季风爆发以及季风强、弱的响应, 得到以下主要结论。

1) 伴随南海夏季风建立, 由于高盐水舌东撤, 净淡水输入增加, Ekman 抽吸速度由上升转为下沉, 南海北部、东部的盐度明显下降, 南部由于净淡水

输入较弱, Ekman 抽吸速度由下沉转为上升, 盐度增加。

2) 强季风年, 南海北部沿岸、东部盐度偏低, 南海南部马来西亚以北海域盐度偏高; 弱季风年南海盐度异常分布则为北部、东部盐度偏高, 南部盐度偏低。南海上层盐度对南海夏季风强度的响应均与南海的净淡水通量、风应力、Ekman 抽吸速度存在密切关系。

3) 南沙、西沙实测站的盐度对夏季风的响应与前面的结果一致。

参考文献

- [1] 田天, 魏皓. 南海北部及巴士海峡附近的水团分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 9-28.
- [2] 赫崇本, 管秉贤. 南海中部 NE-SW 向断面海水热盐结构以及海盆冷水来源的分析[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(5): 411-418.
- [3] 刘增宏, 李磊, 许建平, 等. 1998 年夏季南海水团分析[J]. 东海海洋, 2001, 19(3): 1-10.
- [4] 王凡, 赵永平, 冯志纲, 等. 1998 年春夏南海温盐结构及其变化特征[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 1-13.
- [5] 毛庆文, 王卫强, 齐义泉, 等. 夏季季风转换期间南沙群岛海域的温盐分布特征[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(1): 28-36.
- [6] 杜岩, 王东晓, 陈举, 等. 南海南部混合层底盐度异常水体的结构特征[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(6): 52-59.
- [7] CARTON J A, CHEPURIN G, CAO X, et al. A Simple Ocean Data Assimilation analysis of the global upper ocean 1950-1995, Part 1: methodology[J]. J Phys Oceanogr, 2000a, 30: 294-309.
- [8] 李海洋, 王东晓, 谢强. 热带太平洋海面盐度年际变化的海洋同化数据分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(增): 97-106.
- [9] UPPALA S M, KÅLLBERG P W, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 re-analysis[J]. Quart J R Meteorol Soc, 2005, 131: 2961-3012.
- [10] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437-470.
- [11] 吴尚森, 梁建茵. 南海夏季风强度指数及其变化特征[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 337-344.
- [12] 王凡, 赵永平, 冯志纲, 等. 1998 年春夏南海温盐结构及其变化特征[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 1-13.
- [13] 曾丽丽, 施平, 王东晓, 等. 南海蒸发和净淡水通量的季节和年际变化[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 929-938.
- [14] 杨跃红, 李立, 王肇鼎, 等. 南海的平均 T-S, S-Z, T-Z 特性[J]. 热带海洋学报, 1988, 7(3): 54-59.
- [15] 方文东, 黄企洲, 邱章, 等. 春夏季季风转换期南海南部的异常表层水[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 77-81.
- [16] 李立, 吴日升, 郭小钢. 南海的季节环流——TOPEX / POSEIDON 卫星测高应用研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 13-26.
- [17] 李超, 张燕, 王东晓. 2004 年秋季冷空气活动对南海海表温度的影响[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 6-11.